

Tinjauan Kritis Sensor dan Kalibrasi *Partial Discharge* untuk Diagnosis dan Pemantauan Kondisi Peralatan Tegangan Tinggi

Frenzi Agres Yudithia ^{1*)}, Rosnita Rauf ²⁾, Atik Charisma ³⁾

^{1,2)}Program Studi Teknik Elektro
Universitas Ekasakti

Jalan Veteran Dalam No. 26 Padang -25113

³⁾Program Studi Teknik Elektro

Universitas Jenderal Achmad Yan

Jalan Terusan Jend. Sudirman PO.BOX 148 Cimahi 40531

^{*}Korespondensi : frenziagresyudithia@gmail.com

Abstrak

Pencapaian deteksi andal dan lokalisasi *Partial Discharge* (PD) yang presisi adalah tantangan krusial dalam pemantauan prediktif peralatan tegangan tinggi. *Partial Discharge* mengindikasikan degradasi isolasi, dan pendeteksian diperumit oleh fenomena *multipath* akustik serta distorsi sinyal dari struktur internal peralatan. Tinjauan ini mengkaji konvergensi teknologi sensor dan algoritma canggih untuk mengatasi lokalisasi PD. Kemajuan sensor meliputi *Acoustic Emission* (AE) yang dioptimalkan dengan Model KLM, sensor UHF untuk memfilter kebisingan, dan sensor akustik serat optik inovatif. Untuk akurasi lokalisasi, teknik pemrosesan sinyal telah berkembang melampaui TDOA. Kini, diterapkan algoritma kuat seperti GCC-PHAT untuk meredam kebisingan, dan PSORS untuk memodelkan jalur perambatan sinyal akustik di sekitar penghalang. Alternatifnya adalah lokalisasi online melalui ETFL. Integrasi sensor sensitif dan algoritma *pathfinding* cerdas memberikan solusi diagnosis multimetode yang akurat, mendukung operasional peralatan tegangan tinggi yang lebih andal dan efisien.

Kata kunci : Kalibrasi, Partial Discharge, Pemeliharaan Prediktif , Sensor

Abstract

Achieving reliable detection and precise localization of Partial Discharge (PD) is a crucial challenge in predictive monitoring of high-voltage equipment. Partial Discharge indicates insulation degradation, and detection is complicated by acoustic multipath phenomena and signal distortion from the equipment's internal structure. This review examines the convergence of sensor technologies and advanced algorithms to address PD localization. Sensor advancements include Acoustic Emission (AE) optimized with the KLM Model, UHF sensors for noise filtering, and innovative fiber optic acoustic sensors. For localization accuracy, signal processing techniques have advanced beyond TDOA. Powerful algorithms such as GCC-PHAT for noise suppression and PSORS for modeling the acoustic signal propagation path around obstacles are now applied. An alternative is online localization via ETFL. The integration of sensitive sensors and intelligent pathfinding algorithms provides an accurate multi-method diagnosis solution, supporting more reliable and efficient operation of high-voltage equipment.

Keywords : Calibration, Partial Discharge, Predictive Maintenance, Sensors

I. PENDAHULUAN

Peralatan tegangan tinggi seperti transformator daya, kabel, dan switchgear memiliki peran yang sangat krusial dalam menjamin stabilitas sistem tenaga listrik. Permasalahan muncul ketika seiring bertambahnya usia peralatan utama jaringan listrik tersebut dan diperlukan metode yang handal untuk proses pemeliharaan serta perbaikan dalam mendeteksi kerusakan lebih awal khususnya untuk mengetahui kondisi bagian internal peralatan. Saat ini kebutuhan tersebut dapat terpenuhi ketika dilakukan pemantauan pada peralatan yang sedang beroperasi (*online monitoring*) yang dilakukan secara berkelanjutan, dimana proses ini dapat menghasilkan perekaman tekanan (*stres*) yang relevan sehingga menjadi bahan pertimbangan terhadap masa pakai peralatan. Adapun penyebab utama kerusakan pada

peralatan disebabkan karena adanya peluahan sebagian atau lebih umum disebut *partial discharge* (PD) yang dapat menjembatani muatan pada bahan isolator secara bertahap dapat menimbulkan degradasi pada bahan isolasi yang akan merusak peralatan [1], [2].

Info Makalah:

Dikirim : 29-10-2025
Revisi 1 : 07-12-2025
Revisi 2 : -
Diterima : 22-12-2025

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-82385341107
e-mail : frenziagresyudithia@gmail.com

Oleh karena itu, pemantauan aktivitas PD secara *online* digunakan sebagai metode penting untuk melakukan penilaian kondisi isolasi pada peralatan tegangan tinggi. Meskipun demikian, ada beberapa hal yang akan menjadi tantangan utama dalam melakukan diagnosis untuk kegiatan pemantauan selama mendeteksi PD secara andal dan menentukan sumber lokalisasinya secara akurat [17], [30]. Berdasarkan kemampuan tingkat akurasi tersebut, maka hasil penentuan lokasi akan menjadi sangat penting dalam memberikan informasi posisi PD secara langsung, selanjutnya dapat mengatur strategi kegiatan pemeliharaan.

Kondisi ini mungkin akan menjadi lebih sulit ketika sumber PD terjadi di dalam peralatan yang lebih kompleks seperti transformator, di mana sinyal akustik dapat terdistorsi dan mengalami pelemahan (*attenuation*) selama perambatannya [3], [14]. Pembahasan ini contohnya pada bagian struktur internal transformator seperti belitan dan inti dapat mempengaruhi perambatan gelombang akustik dan waktu kedatangan atau *Time of Arrival* (TOA), hal ini mengacu pada waktu yang dibutuhkan gelombang akustik untuk merambat dari sumber gangguan PD hingga mencapai pendeteksian sensor karena mediumnya yang tidak homogen [14]. Artikel ini secara umum akan mereview penjelasan tentang pendeteksian dan sumber lokasi gangguan peralatan tegangan tinggi yang disebabkan oleh PD. Selanjutnya akan membahas secara mendalam berbagai jenis-jenis sensor dan metode kalibrasi yang telah dikembangkan. Pada tahapan akhir akan dilanjutkan dengan teknik pemrosesan sinyal serta algoritma lokasi yang menjadi kunci untuk mewujudkan pemeliharaan prediktif yang akurat.

II. METODE

Peluhan sebagian merupakan penyebab utama dalam fenomena degradasi bahan isolasi, kejadian ini bisa terjadi di berbagai kondisi karena adanya pelepasan energi di rongga, di permukaan (*creeping*), atau di celah pada bagian isolasi. Selanjutnya indikator dalam degradasi ini dapat dideteksi secara sistematis melalui metode kimia seperti *Dissolved Gas Analysis* (DGA) [12] atau melalui berbagai teknik non-elektrik, seperti pengukuran suara akustik [9], [22], cahaya [11], gelombang elektromagnetik [5], atau analisis gas terlarut. Mengingat peran PD sebagai penanda potensi kegagalan pada bahan isolator, maka diperlukan juga beberapa aspek lainnya seperti sensor, kalibrasi, dan mekanisme yang pada bagian selanjutnya akan diulas untuk mendukung deteksi PD yang andal. Pembahasan ini akan dimulai dengan meninjau sensor-sensor yang dikembangkan (termasuk sensor akustik [19], [22], sensor *Ultra High Frequency* (UHF) [5], dan sensor induktif [25] untuk mendeteksi berbagai sinyal PD. Setelah itu, akan diuraikan metode kalibrasi yang esensialnya untuk memastikan akurasi dan keandalan data yang direkam oleh sensor [4]. Sebagai penutup, akan dibahas mekanisme terjadinya berbagai jenis PD dan bentuk karakteristik sinyal yang merupakan fondasi penting untuk mewujudkan diagnosis kondisi isolasi yang efektif.

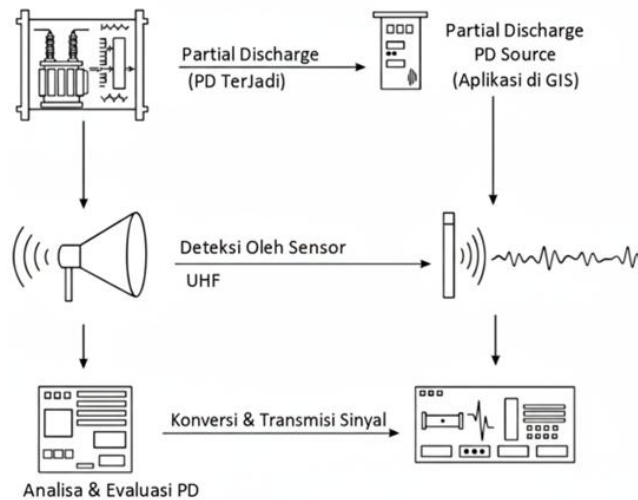
A. Sensor Partial Discharge

Pemilihan sensor yang tepat merupakan langkah yang paling awal dan fundamental untuk mencapai hasil diagnosis *Partial Discharge* (PD) yang efektif. Hal ini disebabkan sinyal PD yang dihasilkan oleh kegagalan isolasi dapat muncul dalam berbagai bentuk fisik [5], [9], diantaranya termasuk pulsa elektrik diukur melalui arus frekuensi ultra-tinggi (UHF) [5], gelombang elektromagnetik yang dideteksi oleh antena frekuensi tinggi [5], dan gelombang akustik ditangkap oleh sensor ultrasonik atau akustik [9]. Mengingat banyaknya variasi sinyal ini, berbagai jenis sensor juga telah dikembangkan secara spesifik untuk masing-masing sinyal. Oleh karena itu perlu untuk memastikan kesesuaian sensor dengan jenis sinyal PD yang lebih dominan, media transmisi (udara, minyak, atau padat) [5], serta lingkungan pengujian adalah penentu utama yang akan menjamin sensitivitas, akurasi, dan keberhasilan keseluruhan proses identifikasi dan lokasi kerusakan isolasi. Berikut ini adalah ulasan mengenai penggunaan dan

karakteristik spesifik dari berbagai jenis sensor yang telah dikembangkan untuk mendeteksi PD sebagai berikut :

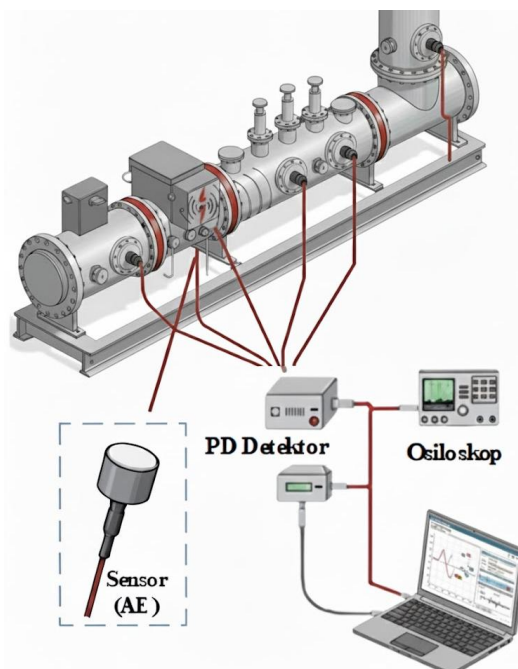
- 1) Sensor Elektrik Tradisional melakukan pengujian PD berdasarkan standar IEC 60270 yang merupakan acuan umum secara garis besar telah mewakili pengukuran PD pada peralatan listrik bertegangan tinggi [1]. Standar ini berlaku untuk pengukuran listrik PD menggunakan tegangan AC hingga 400 Hz dan tegangan DC. Rangkaian pengukuran standar IEC 60270 terdiri dari sinyal PD yang mengalir melalui kapasitansi objek uji (C_a), kapasitor kopling (C_k), perangkat kopling (C_D) dengan impedansi input (Z_{mi}), kabel koaksial (C_C), dan instrumen pengukur (M_I). Rangkaian ini dirancang untuk mengukur pulsa arus PD yang mengalir melalui objek uji (C_a), di mana bagian spektrum frekuensi tinggi dari sinyal inilah yang digunakan untuk mengestimasi keberadaan PD. Salah satu yang menjadi keunggulan dari metode sensor elektrik tradisional yang berbasis IEC 60270 adalah sensitivitasnya yang tinggi terhadap aktivitas PD yang lemah karena bermuatan kecil, diukur dalam satuan pikoCoulomb (pC) menjadi indikasi kerusakan isolasi pada tahap awal. Hal ini juga menjadikannya sebagai alat diagnostik yang efektif untuk mendeteksi PD di dalam transformator atau peralatan lain. Selain itu, fungsi utama metode ini dijadikan untuk pendeteksian dan penentuan muatan semu (*apparent charge*) [1]. Meskipun utamanya berguna untuk pendeteksian dan penentuan muatan semu, beberapa metode dalam kategori elektrik ini dapat memprediksi lokasi PD. Namun demikian, kemampuan untuk lokalisasi menggunakan metode ini masih terbatas, karena umumnya hanya mampu melakukan lokalisasi 1-D (secara linear atau sepanjang konduktor, misalnya nomor belitan atau lilitan) [17]. Selain itu, juga karena sifatnya yang mengukur sinyal listrik sehingga metode ini sangat rentan terhadap interferensi elektromagnetik eksternal di lingkungan operasi. Kerentanan ini mengakibatkan proses pengukuran seringkali memerlukan langkah-langkah penyaringan (*filtering*) dan perisai (*shielding*) yang rumit untuk menjamin keakuratan hasil.
- 2) Sensor *Ultra High Frequency* (UHF) merupakan sistem pemantauan PD yang bekerja dengan mendeteksi gelombang elektromagnetik (EM) secara non-invasif yang disebabkan oleh adanya fenomena PD pada peralatan listrik bertegangan tinggi seperti *Gas-Insulated Switchgear* (GIS) dan transformator daya. Sensor ini dapat bekerja pada rentang frekuensi ultra-tinggi yaitu antara 300 MHz hingga 3 GHz [5]. Langkah awal dalam melakukan metode deteksi menggunakan sensor UHF dilakukan dengan cara menangkap sinyal elektromagnetik yang dihasilkan oleh aktivitas PD. Ini merupakan tahap akuisisi sinyal, di mana pulsa arus PD yang sangat cepat di dalam peralatan listrik memancarkan gelombang EM, yang kemudian dideteksi oleh sensor. Kualitas sinyal yang diakuisisi pada langkah awal ini digunakan sebagai prasyarat utama untuk seluruh proses diagnostik. Tanpa sinyal yang akurat dan bersih dari sensor, analisis lanjutan (seperti penentuan lokasi atau pemodelan pola PD) tidak akan dapat dipercaya. Beberapa hal yang menjadi kelebihan metode deteksi PD menggunakan UHF dilihat pada kemampuannya dalam ketahanan perangkat tersebut menerima sinyal gangguan elektromagnetik dari luar (interferensi). Selanjutnya pada perbandingan antara kekuatan sinyal yang ingin dideteksi (Sinyal PD) dengan kekuatan sinyal yang tidak diinginkan (Derau atau Kebisingan) yang disebut sebagai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) [5]. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang bersih dan andal, terutama saat peralatan sedang beroperasi (*online monitoring*) di lingkungan industri yang ramai. Faktor yang mendasari kelebihan dalam metode ini diantaranya pertama, sifat fisik PD itu sendiri, di mana lucutan sebagian merupakan impuls yang sangat singkat (seringkali rise time < 1 ns pada isolasi minyak) yang memancarkan gelombang EM dominan dalam rentang frekuensi ultra-tinggi dan kedua, adanya perisai alami pada peralatan tegangan tinggi yang tertutup struktur logam seperti tangki transformator atau selubung GIS yang secara efektif menghalangi kebisingan dari eksternal [5]. Kemampuannya dalam mengisolasi sinyal PD secara internal inilah yang memberikan imunitas superior (sistem dengan tingkat ketahanan yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode deteksi PD lainnya terhadap gangguan dari lingkungan luar) dan SNR yang tinggi atau kondisi di mana kekuatan sinyal yang bermanfaat (sinyal PD) jauh lebih besar (dominan) dibandingkan dengan kekuatan sinyal gangguan (derau atau *noise*) yang diterima oleh sensor, sehingga menjadikannya pilihan ideal untuk pengawasan isolasi yang sensitif. Untuk menjamin keakuratan sensor UHF, maka diperlukan penempatan sensor yang optimal guna meminimalkan obstruksi sinyal atau ada halangan fisik antara sumber PD dengan titik di mana terjadi lucutan [20]. Sistem pemantauan kondisi yang komprehensif pada peralatan tegangan tinggi, menggunakan teknologi Sensor UHF dalam menangkap sinyal PD secara non-invasif. bertujuan

untuk mendeteksi anomaly atau pada isolasi secepat mungkin (PD Terjadi → Deteksi → Analisa) sehingga tindakan pencegahan dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan peralatan yang fatal. Alur metode deteksi PD ini secara umum dideskripsikan pada Gambar 1 langkahnya dimulai dari Sumber PD, misalnya di dalam trafo dan GIS yang kemudian menghasilkan Emisi Sinyal UHF. Sinyal ini selanjutnya ditangkap melalui Deteksi oleh Sensor UHF, sebelum diproses melalui konversi dan transmisi Sinyal (menggunakan Data Converter dan Transmitter). Tahap terakhir dilakukan analisis serta evaluasi PD, di mana data sinyal yang diterima dianalisis untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengevaluasi karakteristik PD tersebut.



Gambar 1 Sistem Deteksi dan Analisis PD Menggunakan Sensor UHF pada (Trafo dan GIS).

- 3) Sensor Akustik Ultrasonik contohnya pada Teknik *Acoustic Emission* (AE) atau termasuk salah satu jenis sensor dengan metode deteksi non-invasif, perannya juga sangat penting dalam pemeliharaan prediktif untuk diagnosis PD terutama pada perangkat tegangan tinggi seperti transformator dan GIS [22]. Gelombang tekanan akustik yang dihasilkan sensor ini berfungsi sebagai pembawa informasi spasial (lokasi) PD. Kemampuan sensor AE dalam menangkap dan membandingkan kedatangan gelombang PD di beberapa titik menjadikan hasil diagnosa akan akurat. Sehingga kegiatan pada proses ini lebih aman karena bersifat non-invasif dan dapat memprediksi penentuan lokasi kerusakan dalam tindakan perbaikan terencana tanpa perlu mematikan daya (*online*)[17].



Gambar 2 Pemantauan PD *Online* GIS menggunakan Sensor AE

Penggunaan sensor AE harus dioptimalkan untuk mencapai tingkat sensitivitas ultra tinggi yaitu kemampuan untuk menangkap pulsa PD yang sangat lemah karena pulsa PD awal seringkali memiliki energi yang sangat kecil. Optimasi ini akan ditentukan pada pemilihan jenis material sensor sehingga mencapai sensitivitas maksimum serta dikenal kuat yaitu menggunakan keramik piezoelektrik PZT tipe 5A [6]. Sebagai salah satu contohnya pada Sensor AE Tipe A6890 dirancang dengan elemen penginderaan ganda untuk mengoptimalkan respons frekuensi dan SNR. Sistem deteksi PD menggunakan Sensor AE bekerja dengan memasang sensor di dekat lokasi PD pada peralatan. Sensor AE mengubah gelombang tekanan akustik PD menjadi sinyal listrik yang kemudian diproses oleh PD Detektor (difilter dan diukur). Sinyal ini selanjutnya divisualisasikan melalui osiloskop untuk verifikasi dan kemudian dianalisis menggunakan laptop untuk diagnosis mendalam dan penentuan lokasi sumber PD. Proses ini memungkinkan pemantauan online dan lokalisasi kerusakan isolasi secara efektif [13]. Gambar 2 mengilustrasikan konfigurasi sistem pemantauan kondisi online dan diagnosis PD yang memanfaatkan gelombang akustik. Sistem ini terdiri dari tiga komponen yang saling terhubung (Peralatan Tegangan Tinggi GIS, Sensor AE, dan Unit Pemrosesan Sinyal). Secara teknis dalam optimasi desain sensor AE yang merupakan sebagai transduser piezoelektrik, dapat dilakukan menggunakan Model *Krimholtz-Leedom-Matthaei* (KLM) [6]. Model KLM berperan dalam optimasi desain sensor AE untuk memprediksi dan menganalisis sifat material seperti pada keramik PZT tipe 5A dan bentuk geometri sensor meliputi ketebalan elemen dengan menjadi alat simulasi prediktif. Hal ini dapat memastikan bahwa sensor yang diproduksi akan mencapai sensitivitas ultra-tinggi dan respons frekuensi optimal yang diperlukan untuk mendeteksi pulsa PD yang lemah dan menghasilkan SNR terbaik [6]. Setelah dilakukan optimasi, kinerja sensor juga dievaluasi lebih lanjut melalui analisis karakterisasi mendalam dengan mengubah data sensor mentah menjadi informasi diagnostik yang akurat dan dapat ditindaklanjuti. Kemudian sinyal AE yang terukur dalam domain frekuensi ditentukan menggunakan dua rumus kunci [6]:

- Frekuensi Sentroid ($f_{centroid}$) Frekuensi Sentroid memberikan frekuensi rata-rata berbobot dari seluruh spektrum frekuensi sinyal AE:

$$f_{centroid} = \frac{\sum_{k=1}^N k \cdot F[k]}{\sum_{k=1}^N F[k]} \quad (1)$$

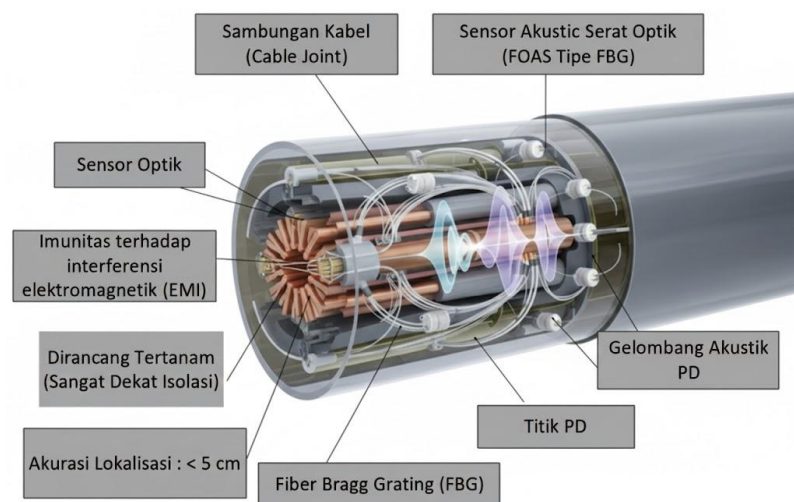
Di mana $F[k]$ adalah besaran yang sesuai dengan bin k dalam spektrum frekuensi.

- Frekuensi Puncak Berbobot (f_{peak}) Frekuensi Puncak Berbobot adalah rata-rata geometrik dari Frekuensi Puncak (f_{peak}) dan Frekuensi Sentroid ($f_{centroid}$):

$$(f_{peak}) = \sqrt{(f_{peak}) \cdot (f_{centroid})} \quad (2)$$

- 4) Sensor Optik dan Kimia seperti *Fiber-Optic Acoustic Sensors* (FOAS) juga merupakan bagian metode yang digunakan untuk pemantauan PD secara *online* tanpa perlu mematikan peralatan, karena FOAS dapat mengatasi masalah terbesar deteksi PD yaitu derau elektromagnetik sehingga menjadikannya sangat andal dan unggul. karena keunggulan utamanya berupa imunitas total terhadap *Electromagnetic Interference* (EMI) saat sensor ini berada di lingkungan operasional bertegangan tinggi, metode deteksi kelistrikan konvensional sangat rentan terhadap EMI seperti *corona* atau *switching* yang dapat menutupi sinyal PD yang lemah. FOAS mengatasi masalah ini karena beroperasi menggunakan prinsip optik dimana cahaya melalui serat optik, bukan listrik, sehingga menjamin tingkat SNR yang sangat tinggi dan menghasilkan data diagnostik yang bersih dan akurat [7], [11]. Pengembangan larik sensor akustik serat optik dengan menggunakan beberapa elemen berbasis *Fiber Bragg Grating* (FBG) yang masing-masing berfungsi sebagai titik deteksi individual dilakukan dengan meminimalkan jumlah kabel yang diperlukan sambil memaksimalkan jumlah titik sensor untuk lokalisasi PD di dalam belitan transformator [8]. Sehingga untuk mencapai tingkat akurasi lokalisasi PD yang terjadi di dalam belitan transformator (dengan eror kurang dari 5 cm), selain itu model desain larik sensor yang harus dipasang sangat dekat atau bahkan tertanam di

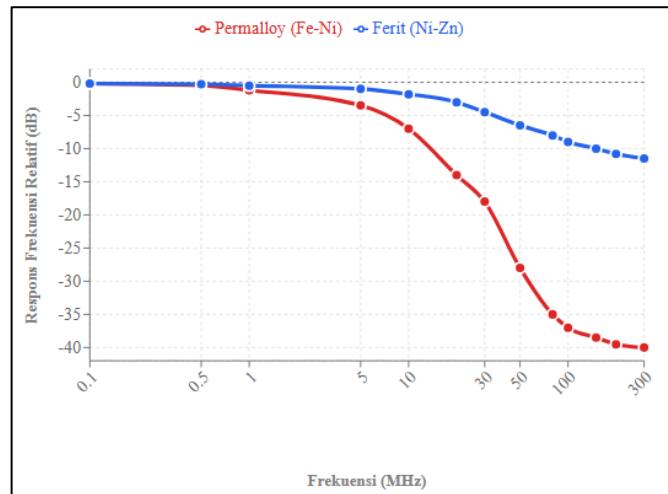
dalam belitan. Sensor yang telah dikembangkan seperti sensor akustik serat optik *Fabry-Pérot* (F-P), dirancang dengan ukuran yang ringkas dan tingkat isolasi yang sangat tinggi. Sensor yang ditanamkan ini harus mampu bertahan dalam kondisi ekstrem selama proses fabrikasi transformator, termasuk situasi vakum serta suhu dan tekanan yang berbeda saat penghilangan kelembapan dan pengisian minyak isolasi. Lokalisasi PD yang akurat dicapai dengan menganalisis *Time Difference of Arrival* (TDOA) dari sinyal akustik yang diterima oleh masing-masing sensor dalam larik [7]. Selain itu ada juga inovasi terbaru dalam penggunaan larik sensor jenis ultrasonik serat optik dengan menggunakan keseimbangan tekanan untuk melokalisasi sumber PD yang Ganda dalam minyak transformator [23]. Gambar 3. merepresentasikan bagaimana sistem FOAS mendeteksi *Partial Discharge* (PD) yang terjadi di dalam sambungan kabel HV dengan menangkap gelombang akustik yang dihasilkan oleh lucutan tersebut. Sensor serat optik yang tertanam atau terpasang sangat dekat dengan isolasi akan mendeteksi gelombang ini pada waktu yang berbeda di setiap titik sensor. Perbedaan waktu kedatangan atau TDOA antar sensor ini kemudian diolah dan di analisis untuk menentukan lokasi pasti sumber PD. Sistem ini menjadi penting untuk pemeliharaan prediktif pada infrastruktur kelistrikan tegangan tinggi, terutama transformator dan sambungan kabel HV.



Gambar 3 Sistem Deteksi PD Akustik Serat Optik (FOAS) Pada Sambungan Kabel HV

- 5) Sensor Induktif merupakan jenis sensor non-konvensional yang juga banyak digunakan untuk pemantauan *partial discharge* (PD) secara online, sensor ini umumnya dikenal dengan *High Frequency Current Transformer* (HFCT). Hal ini didasarkan pada sifatnya yang non-invasif serta kompatibel dengan peralatan bertegangan tinggi yang sedang beroperasi. Sensor ini bekerja dengan cara melingkari konduktor (kawat fasa atau kawat tanah) untuk mendeteksi pulsa arus frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh aktivitas PD [24]. Sensitivitas dan fidelitas sensor HFCT sangat bergantung pada desain mekanis dimana pada prosesnya diartikan sebagai tingkat akurasi suatu sistem dalam mereproduksi sinyal keluaran yang identik atau sangat menyerupai sinyal masukan aslinya. Kinerja Sensor dalam mendeteksi pulsa PD yang lemah sangat dipengaruhi oleh tiga faktor utama material inti diantaranya permeabilitas inti, kerapatan fluks saturasi, dan stabilitas suhu. Permeabilitas inti yang tinggi dibutuhkan untuk sensitivitas, memungkinkan sensor menangkap medan magnet dari pulsa PD yang sangat kecil. Kerapatan fluks saturasi yang memadai penting untuk fidelitas, memastikan sinyal PD yang kuat tidak mengalami distorsi atau pemotongan. Sementara itu, stabilitas suhu menjamin bahwa parameter magnetik inti tetap konsisten, sehingga pengukuran yang dilakukan HFCT tetap akurat dan andal meskipun terjadi fluktuasi disekitar lingkungan. Pengendalian faktor-faktor ini sangat penting untuk membedakan bentuk pulsa PD dari gangguan EMI yang kuat [25]. Berbagai pengembangan yang dilakukan seperti mengoptimalkan bentuk dari geometri sensor PD, pengembangan antena loop tanpa efek resonansi untuk meningkatkan fidelitas sinyal, serta perancangan sensor dengan bentuk inti yang telah dioptimalkan misalnya pada HFCT dalam memudahkan instalasi di kondisi nyata. Selain itu dengan upaya optimasi desain sensor, seluruh pengukuran dan pengujian PD harus dilakukan sesuai dengan standar teknis internasional.

Standar acuan utama adalah IEC 60270, yang menetapkan prosedur dan persyaratan kalibrasi untuk memastikan bahwa muatan PD yang terukur adalah terstandarisasi dan dapat diperbandingkan secara global [1].



Gambar 4 Respons Frekuensi Relatif Inti Magnetik Permalloy dan Ferit pada Sensor HFCT

Pemilihan material dari bagian inti magnetik sangat memegang peran penting dalam menentukan rentang frekuensi kerja dan resolusi pulsa PD. Berdasarkan studi perbandingan material, Permalloy (Fe-Ni) menunjukkan permeabilitas awal yang sangat tinggi ($\mu_i = 5000 - 10.000$) yang ideal untuk frekuensi rendah (di bawah 100 kHz) [25]. Namun, Permalloy memiliki resistivitas listrik yang rendah ($\sim 10^7 \Omega m$) yang memicu timbulnya arus Foucault (arus pusar) yang kuat pada eksitasi frekuensi tinggi. Efek ini menyebabkan pergeseran (damping) sinyal dan melebarkan respons impuls, sehingga mengurangi kemampuan sensor untuk merekam pulsa PD sub-nanodetik dengan resolusi tinggi. Sebaliknya, ferit berbasis $MO.Fe_2O_3$ adalah keramik oksida logam dengan resistivitas tinggi ($10^2 - 10^4 \Omega.m$), yang secara efektif menekan arus Foucault. Meskipun memiliki permeabilitas awal yang moderat ($\mu_i = 200 - 1000$), ferit $MO.Fe_2O_3$ mempertahankan respons frekuensi yang relatif datar hingga puluhan atau ratusan MHz. Hal ini menjadikannya lebih unggul untuk diagnosis PD karena mampu mereproduksi bentuk pulsa PD dengan distorsi minimal. Hasil perbandingan respons frekuensi material Fe-Ni dan $MO.Fe_2O_3$ ditunjukkan pada Gambar 4. Respons frekuensi kedua material inti magnetik. Grafik menunjukkan bahwa respons frekuensi Permalloy menurun tajam seiring peningkatan frekuensi, mengindikasikan atenuasi sinyal yang tinggi, sedangkan respons ferit $MO.Fe_2O_3$ relatif lebih datar, yang dibutuhkan untuk reproduksi akurasi sinyal pulsa PD [25].

- 6) Sensor Nirkabel Pasif atau dikenal *Passive Wireless Sensors* merupakan inovasi teknologi yang lebih signifikan karena kemudahannya instalasinya dan keandalan pengukuran pada peralatan tegangan tinggi dalam melakukan pemantauan PD. Sensor ini memberikan Solusi praktis karena tidak memerlukan kabel daya atau sinyal fisik yang memungkinkan sensor dipasang di tempat (*in-situ*) bahkan di dalam atau sangat dekat dengan komponen kritis peralatan seperti GIS atau belitan transformator di mana kabel konvensional sulit atau berbahaya untuk dipasang. Sensor ini dirancang untuk beroperasi secara pasif, yang berarti tidak memerlukan sumber daya internal atau sambungan langsung ke peralatan tegangan tinggi (HV). Prinsip kerja sensor nirkabel pasif berdasarkan pada mekanisme resonansi, di mana sensor yang umumnya berupa rangkaian LC resonator akan merespons sinyal *Radio Frequency* (RF) yang dipancarkan oleh perangkat pembaca (*readout device*) yang terletak jarak jauh. Kemudian data yang terukur misalnya PD diubah menjadi nilai Induktansi (L) atau Kapasitansi (C) sensor, yang selanjutnya akan mengubah frekuensi resonansi sensor (f_0). Perangkat pembaca kemudian mendeteksi perubahan f_0 dari sinyal yang dipancarkan kembali, sehingga ini yang menjadikannya dapat terhubung secara nirkabel untuk nilai pengukuran besaran fisik yang diukur. Perangkat pembaca memulai proses deteksi dengan mengirimkan energi nirkabel

pasif dalam bentuk gelombang RF ke sensor, yang berfungsi untuk mengaktifkan rangkaian resonansi LC pada sensor. Setelah diaktifkan, sensor kemudian memancarkan kembali (*ring back*) sinyal RF pada frekuensi resonansinya (f_0). Sinyal yang dipancarkan kembali ini telah dimodulasi oleh medan listrik di sekitarnya akibat aktivitas PD. Perubahan medan listrik PD menyebabkan pergeseran kecil pada f_0 . Perangkat pembaca kemudian menganalisis pergeseran frekuensi resonansi ini, sehingga sensor ini dapat dijadikan representasi nirkabel yang akurat dari aktivitas PD. Keunggulan teknologi sensor nirkabel pasif yaitu kemampuannya untuk mengeliminasi kebutuhan kontak langsung dengan apparatus tegangan tinggi. Hal ini tentu akan meningkatkan keamanan bagi personel dan peralatan karena tidak ada jalur konduktif fisik ke lingkungan bertegangan tinggi. Selain itu, sensor ini pemasangannya sederhana (*plug-and-play*), karena tidak memerlukan kabel daya atau sinyal yang rumit. Selain itu, teknologi ini secara efektif dapat mengurangi masalah pemuatan sumber (*source loading*) yang sering terjadi pada sensor konvensional berkabel, di mana koneksi sensor dapat mengubah atau membebani sinyal yang sedang diukur. Sensor nirkabel pasif yang diimplementasikan pada GIS sering dirancang dengan fitur resonansi ganda atau multi-resonansi. Desain ini bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas dengan mencakup deteksi PD di berbagai pita frekuensi misalnya, 0–800 MHz, memastikan pulsa PD tidak terlewatkan. Sensor ini dipasang di dalam kompartemen peralatan (misalnya, melalui jendela observasi GIS) dan sinyalnya dibaca secara nirkabel dari luar. Konfigurasi ini secara efektif mengeliminasi EMI dan jalur kebocoran, sehingga sistem mampu mencapai SNR yang sangat tinggi dan presisi yang optimal. Hal ini menjadikan sensor nirkabel pasif sebagai instrumen penting untuk mendiagnosis kondisi isolasi secara online dan berkelanjutan [26].

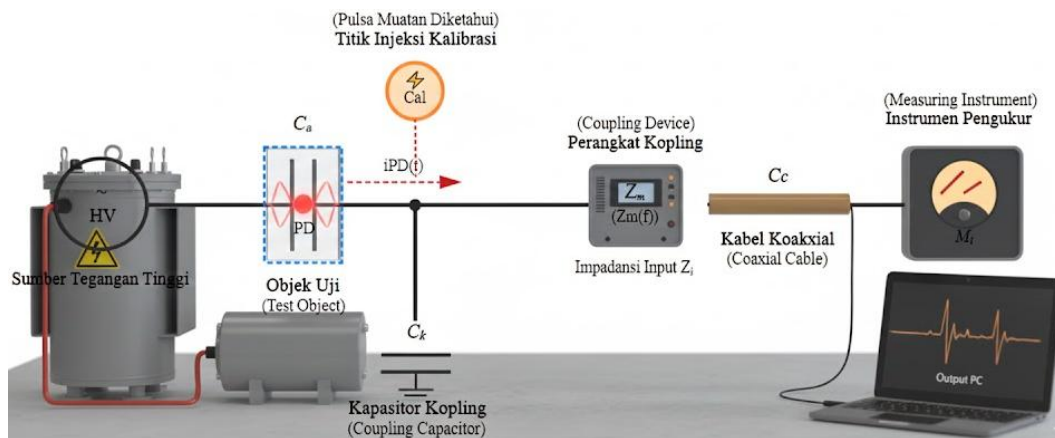
B. Metode Kalibrasi Partial Discharge

Kalibrasi merupakan tahapan fundamental dan sangat krusial dalam proses diagnosis *Partial Discharge* (PD) karena berfungsi sebagai jembatan antara sinyal mentah yang diukur oleh sensor misalnya tegangan dalam mV atau tekanan akustik dengan besaran fisik yang memiliki nilai diagnostik. Secara praktis kalibrasi juga dapat menentukan faktor konversi yang akurat untuk mengubah pembacaan mV sensor menjadi muatan PD terstandardisasi (Q), yang diukur dalam PicoCoulomb (pC). Proses ini memastikan bahwa hasil pengukuran dapat diperbandingkan secara universal dan valid untuk menilai tingkat keparahan isolasi. Proses ini memastikan sinyal yang terdeteksi dapat diubah menjadi besaran muatan listrik yang lebih absolut. Jika terjadi kegagalan dalam proses kalibrasi, terutama pada jenis sensor non-elektrik seperti *Acoustic Emission* (AE), sehingga akan dapat menyebabkan ketidakakuratan pembacaan serta respon sensitivitasnya menurun terhadap wilayah sekitarnya. Selain itu tingkat akurasi hasil juga dipengaruhi pada media perambatan seperti minyak isolasi serta struktur tangkinya, posisi sensor, dan bentuk geometri peralatan trafo. Tanpa metode kalibrasi yang tepat, diagnosis *Partial Discharge* (PD) menggunakan sinyal akustik akan sangat terganggu, terutama saat di dalam belitan transformator. Sinyal PD akan terlindung (melemah), tergaung, dan terdistorsi secara masif saat merambat melalui media isolasi dan struktur internal yang tidak homogen. Degradasi sinyal ini menciptakan interferensi *multipath* yang dapat merusak validitas perhitungan *Time Difference of Arrival* (TDOA), karena sulit untuk secara akurat menentukan waktu tiba pulsa PD yang pertama. Kegagalan dalam perhitungan TDOA yang pada akhirnya menghasilkan kesalahan dalam penentuan koordinat spasial PD (lokalisasi), sehingga membuat hasil diagnosis tidak dapat menjadi acuan untuk pemeliharaan prediktif [4]. Akhirnya, data yang tidak valid akan menyebabkan rencana pemeliharaan yang tidak tepat, bahkan akan meningkatkan risiko kerusakan fatal dan pemadaman listrik yang tidak terencana. Berikut ini metode kalibrasi yang digunakan dalam pendeteksian sinyal PD diuraikan sebagai berikut :

- 1) Kalibrasi Elektrik Standar menjadi acuan utama yang digunakan untuk sistem pengukuran *Partial Discharge* (PD) konvensional. Metode ini mengacu pada pulsa injeksi sesuai standar IEC 60270 (*high voltage test techniques partial discharge measurements*) [1]. Berdasarkan tujuan utama dari kalibrasi ini adalah agar dapat memastikan bahwa pulsa tegangan atau arus yang terukur oleh instrumen diubah secara akurat menjadi nilai muatan semu (*apparent charge*) dalam satuan pikoCoulomb (pC) [1], [27]. Nilai pC ini menjadi acuan besarnya peluahan yang terjadi dalam isolasi peralatan Listrik [27]. Standar IEC 60270 juga menetapkan persyaratan untuk sirkuit uji, termasuk kapasitor penggandeng dan alat ukur. Standar ini mengharuskan sistem dikalibrasi dengan menyuntikkan pulsa muatan yang diketahui ke dalam terminal uji. Proses kalibrasi ini sekaligus dapat memvalidasi sensitivitas dan keandalan sistem pengukuran PD untuk mendeteksi kerusakan isolasi

Tinjauan Kritis Sensor dan Kalibrasi Partial Discharge untuk Diagnosis dan Pemantauan Kondisi Peralatan Tegangan Tinggi
(Frenzi Agres Yudithia, Rosnita Rauf, Atik Charisma : Halaman 106 – 121)

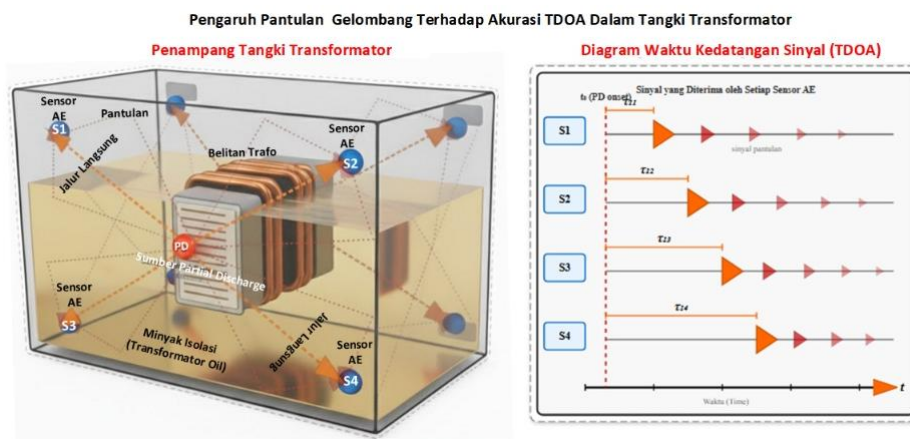
pada peralatan tegangan tinggi salah satunya pada transformator daya. Sistem pengukuran standar IEC 60270 ditunjukkan pada Gambar 5 secara umum terdiri dari sinyal PD yang mengalir melalui kapasitansi objek uji (C_a), kapasitor kopling (C_k), perangkat kopling (CD) dengan impedansi input (Z_{in}), kabel koaksial (CC), dan instrumen pengukur (MI). Rangkaian ini dirancang untuk mengukur pulsa arus PD yang mengalir melalui objek uji (C_a), di mana *High-Frequency Content* sebagai bagian dari sinyal PD yang berada pada pita *Ultra High Frequency* (UHF), ratusan MHz hingga GHz atau lebih kecil *High Frequency* (HF) puluhan MHz yang dari sinyal inilah yang digunakan untuk mengestimasi keberadaan PD. Keunggulan utama metode ini adalah sensitivitasnya yang tinggi terhadap aktivitas PD yang lemah, dan fungsi utamanya adalah untuk pendeteksian dan penentuan muatan semu [1].



Gambar 5. Sistem Pengukuran Partial Discharge Standar IEC 60270

- 2) Kalibrasi secara In-Situ dan Absolut merupakan dua tahapan esensial untuk memvalidasi dan mengkonversi sinyal yang dideteksi dalam pengukuran PD, sehingga menjadi besaran muatan listrik yang absolut. Kalibrasi Absolut memberikan besaran dasar yang terstandardisasi, sementara Kalibrasi In-Situ memastikan besaran tersebut akurat dan valid setelah memperhitungkan kompleksitas lingkungan nyata peralatan tegangan tinggi [27]. Pendekatan ini dilakukan bertujuan agar sinyal yang ditangkap oleh berbagai jenis sensor, terutama non-elektrik, dapat diukur dalam satuan fisik yang relevan, seringkali dilakukan di lokasi (in-situ) untuk memperhitungkan kondisi operasional dan bentuk geometri spesifik peralatan. Dalam sistem AE, kalibrasi sistem secara rutin dilakukan menggunakan metode Hsu-Nielsen untuk mengubah sinyal tegangan sensor dalam (mV) menjadi besaran fisik terukur yang relevan misalnya pada energi atau perpindahan permukaan. Selain itu, untuk Sensor HFC dalam menentukan estimasi muatan PD (pC) dapat diperoleh secara universal dengan menerapkan integral waktu ganda pada sinyal tegangan yang terukur. Keefektifan teknik integral waktu ganda ini menandakan bahwa hasilnya valid terlepas dari fungsi transfer spesifik sensor, menjadikannya metode yang kuat untuk mendapatkan nilai muatan PD yang dapat diperbandingkan [24]. Selain itu, akurasi kalibrasi juga sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri cacat pada isolasi padat. Selain itu, bentuk rongga bola (*spherical*) menghasilkan nilai kapasitor terkalibrasi yang lebih tinggi dan tegangan melintasi rongga (V_c) yang lebih rendah, dibanding kan dengan rongga berbentuk silinder atau pelat-pelat [27].
- 3) Kalibrasi pada sensor non-elektrik yang secara khusus pada penggunaan jenis sensor AE, umumnya juga terdapat kendala utama dalam penentuan lokalisasi sumber PD disebabkan karena sensitivitasnya yang sangat tinggi terhadap lingkungan sekitarnya. Akurasi hasil lokalisasi sangat bergantung pada media perambatan seperti minyak isolasi serta struktur tangki, posisi sensor, dan bentuk geometri peralatan trafo, yang semuanya memengaruhi jalur tempuh gelombang akustik. Kendala terbesar yang menyebabkan ketidakakuratan lokalisasi PD akustik adalah interferensi *multipath* atau gaung.

Fenomena ini terjadi akibat pantulan gelombang akustik oleh dinding dan komponen internal di dalam tangki trafo. Interferensi *multipath* menghasilkan sinyal berganda yang tiba di sensor pada waktu yang berbeda-beda, bukan hanya satu sinyal yang jelas. Hal ini secara langsung merusak validitas perhitungan TDOA, yang merupakan prinsip dasar lokalisasi akustik yang mengandalkan pengukuran waktu kedatangan (τ), dan menyebabkan kesalahan secara signifikan pada penentuan koordinat PD. Masalah ini diperparah ketika PD terjadi di dalam belitan trafo, di mana sinyal akustik menjadi terlindung, tergaung, dan terdistorsi secara masif sepanjang perambatannya. Kendala praktis lainnya adalah kopling akustik yang tidak tepat antara sensor dan permukaan tangki. Gambar 6 merupakan ilustrasi interferensi *multipath* dan diagram waktu kedatangan sinyal (TDOA) dalam lokalisasi sumber PD menggunakan sensor AE. Gambar ini secara visual menjelaskan tantangan utama dalam kalibrasi sensor non-elektrik. Diagram ini terbagi menjadi dua panel yakni panel kiri menunjukkan penampang tangki transformator (berisi Minyak Isolasi dan belitan transformator) dengan sumber PD di tengahnya, di mana sinyal akustik menempuh jalur langsung yang ideal dan jalur pantulan (*Multipath*) yang tidak diinginkan akibat pantulan gelombang akustik oleh dinding tangki atau struktur internal. Panel kanan mengilustrasikan hasil pengukuran dalam domain waktu yang dikenal sebagai Diagram Waktu Kedatangan Sinyal (TDOA). Untuk setiap sensor (S1 hingga S4), diagram menunjukkan pulsa pertama (dari jalur langsung) diikuti oleh satu atau lebih sinyal pantulan (gaung) yang tiba lebih lambat. Adanya sinyal berganda yang tiba pada waktu berbeda ini menyebabkan sinyal *multipath*, yang secara langsung merusak validitas perhitungan Perbedaan Waktu Kedatangan (TDOA) dan menyebabkan kesalahan signifikan pada penentuan koordinat PD [4].



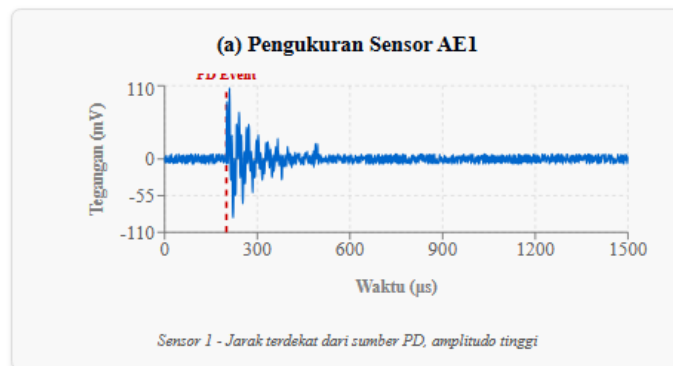
Gambar 6 Interferensi *Multipath* Dalam Lokalisasi Sumber PD Menggunakan *Acoustic Emission* (AE)

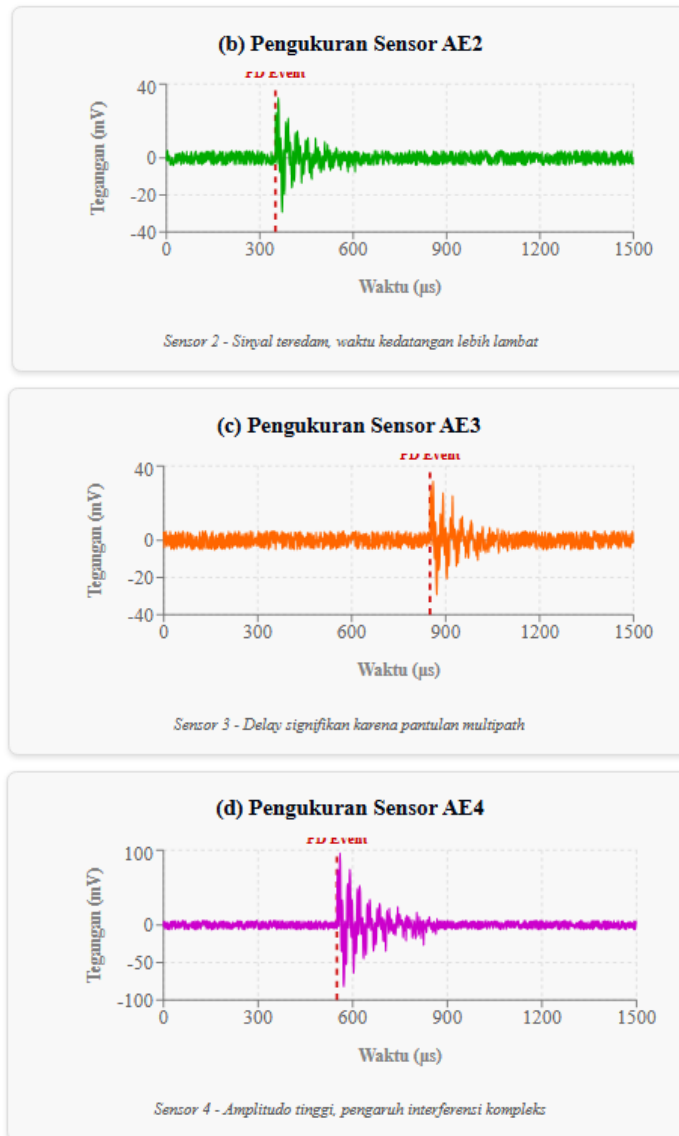
C. Teknik Pengurangan Bising dan Pemrosesan Sinyal

Setelah sinyal PD berhasil dideteksi dan dikalibrasi, langkah selanjutnya yang menjadi pilihan adalah memproses sinyal mentah yang terkontaminasi oleh bising dan pantulan untuk mencapai lokalisasi sumber PD yang akurat. Untuk mengatasi kelemahan dasar pada metode TDOA yang rentan terhadap hambatan, teknik pemrosesan sinyal ini telah berevolusi dari metode dasar TDOA menjadi berbagai algoritma canggih. Pengembangannya melalui metode domain waktu-frekuensi atau *Time-Frequency Domain Methods* seperti *Discrete Wavelet Transform* (DWT), yang efektif sebagai algoritma pemisahan PD multi-sumber ketika sinyal AE saling tumpang tindih menggunakan teknik korelasi seperti *Generalized Cross-Correlation with Phase Transformation* (GCC-PHAT), yang unggul dalam meredam kebisingan dan pantulan [17], serta simulasi numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) 3D [18], [21] dan Algoritma *Particle-Swarm-Optimization Route-Searching* (PSORS) [21] dapat secara cerdas memodelkan jalur perambatan sinyal akustik di sekitar struktur internal yang menghalangi. Selain itu, teknik seperti *Invariant Extended Kalman Filter* (IEKF) digunakan untuk mitigasi noise [15], dan pendekatan berbasis *Machine Learning* [17] menunjukkan hasil yang menjanjikan untuk lokalisasi yang lebih cepat. Alternatif lokalisasi online juga mencakup metode berbasis fungsi transfer elektrik [29], yang

lebih baik daripada metode akustik ketika PD terletak jauh di dalam lilitan karena redaman sinyal suara yang tinggi. Integrasi sensor sensitif dengan algoritma cerdas ini merupakan kunci untuk mewujudkan diagnosis multimetode yang akurat, yang mendukung diagnosis berbasis lokalisasi dan diagnosis multimetode (kombinasi AE dengan Pencitraan Termal atau DGA) untuk operasional peralatan tegangan tinggi yang lebih andal [12], [30].

1) Metode Domain Waktu Frekuensi atau *Time-Frequency Domain* merupakan salah satu pendekatan penting dalam analisis sinyal untuk mendeteksi dan melokalisasi PD. Teknik ini menjadi sangat relevan ketika terjadi beberapa sumber PD muncul secara bersamaan, di mana sinyal AE yang dihasilkan dapat saling tumpang tindih pada sensor. Metode ini, diterapkan menggunakan teknik seperti DWT, dimana bertindak sebagai algoritma pemisahan pada PD multi-sumber agar mengatasi tantangan identifikasi dan lokalisasi PD secara simultan menggunakan teknik AE. Metode DWT dapat digunakan untuk analisis sinyal secara bersamaan dalam domain waktu dan frekuensi. Selanjutnya dalam menganalisis sinyal dalam domain waktu-frekuensi, teknik ini juga sebagai pemisahan yang efektif antara pulsa PD yang sebenarnya bersumber dari sinyal bising dan interferensi yang ada [17]. Sehingga akan meningkatkan akurasi dalam memproses pulsa emisi akustik yang dihasilkan oleh PD. Sinyal AE yang terukur dari PD merupakan sinyal mentah yang memerlukan pemrosesan Domain Waktu-Frekuensi seperti analisis wavelet untuk diekstrak dan dianalisis. Gambar 7 merupakan contoh pengukuran hasil sinyal AE dari empat sensor berbeda yang mengilustrasikan sinyal PD mentah yang direkam dalam domain waktu (Tegangan (mV) terhadap Waktu (μ s)), dan memerlukan pemrosesan domain waktu-frekuensi seperti analisis wavelet untuk diekstrak dan dianalisis. Setiap sensor menangkap pulsa PD yang berbeda, mencerminkan jarak, redaman, dan interferensi. Misalnya, Pengukuran Sensor AE1 (a) menunjukkan sensor yang paling dekat dengan sumber PD, ditandai dengan waktu kedatangan paling awal (sekitar 200 μ s) dan amplitudo tinggi. Sebaliknya, Pengukuran Sensor AE2 (b) menunjukkan sinyal yang tereda dengan waktu kedatangan yang lebih lambat (sekitar 350 μ s), mengindikasikan jarak yang lebih jauh. Pengukuran Sensor AE3 (c) menunjukkan delay signifikan (sekitar 850 μ s) dan amplitudo rendah, yang dapat disebabkan oleh pantulan multipath atau jarak yang sangat jauh. Sementara itu, Pengukuran Sensor AE4 (d) menunjukkan amplitudo relatif tinggi dengan waktu kedatangan (sekitar 550 μ s), dengan kemungkinan pengaruh interferensi kompleks. Sinyal-sinyal mentah yang kompleks dan tumpang tindih ini memerlukan teknik seperti Discrete Wavelet Transform (DWT) (Metode Domain Waktu-Frekuensi) untuk melakukan pemisahan PD multi-sumber yang efektif, memisahkan pulsa PD sebenarnya dari bising dan interferensi sebelum lokalisasi akurat dapat dilakukan.



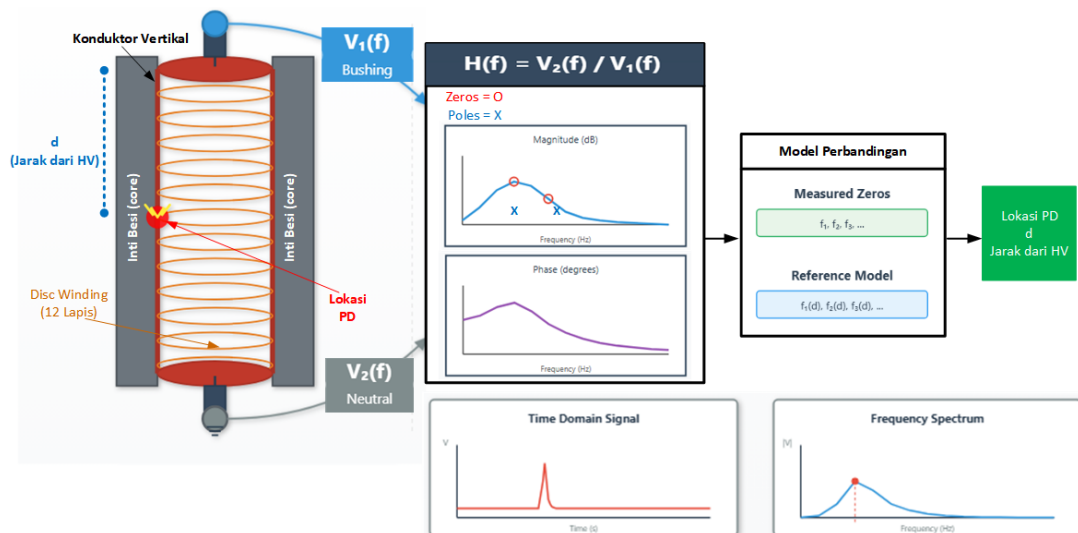


Gambar 7 Pengukuran Sinyal Menggunakan Empat Sensor AE (a) Sensor AE1, (b) Sensor AE2, (c) Sensor AE3, (d) Sensor AE4.

- 2) Teknik Pengenalan Pola (*Pattern Recognition*) dan Pembelajaran Mesin (*Machine Learning*) menjadi pilihan yang sangat penting dalam lokalisasi dan diagnosis PD karena kemampuannya dalam mengolah dan menginterpretasikan sinyal yang kompleks dan pada kondisi bising. Lokalisasi PD akustik selain bertujuan menentukan posisi sumber PD, juga sangat bergantung pada perhitungan TDOA yang menggunakan minimal empat sensor. Untuk mengatasi kebisingan dan pantulan yang merusak akurasi TDOA, studi menunjukkan bahwa metode Korelasi Silang Umum dengan Transformasi Fasa (GCC-PHAT) terbukti unggul karena kemampuannya meredam kebisingan dan pantulan. Sebagai contoh, dalam perbandingan TDOA, GCC-PHAT mengungguli GCC standar, terutama dalam konfigurasi sensor yang terpusat. Selain lokalisasi, manfaat lainnya yaitu kemampuan klasifikasi jenis PD berdasarkan intensitas gelombang AE misalnya, korona menunjukkan intensitas terkuat, diikuti oleh *creepage discharge* dan PD dalam gelembung. Selain itu juga terdapat kekurangan dari lokalisasi berbasis TDOA tradisional ini, dimana rentan terhadap hambatan propagasi sinyal. Untuk mengatasi kekurangan ini, *Machine Learning* digunakan untuk mempercepat dan meningkatkan akurasi lokalisasi, memanfaatkan kemampuan kecerdasan buatan (AI) untuk belajar dari data dan mengidentifikasi pola lokasi [17], [30], hal ini seringkali

- dikombinasikan dengan algoritma pencarian jalur (*pathfinding algorithms*) seperti Algoritma Dijkstra [18].
- 3) Simulasi Numerik dan Algoritma *Pathfinding* merupakan teknik canggih yang diterapkan untuk mengatasi kelemahan utama metode TDOA tradisional yang sangat rentan terhadap hambatan propagasi sinyal, terutama di lingkungan kompleks seperti transformator. Untuk meningkatkan akurasi TDOA, perlu dilakukan pemodelan yang kompleks terhadap jalur perambatan sinyal akustik. Langkah ini juga dilakukan melalui simulasi numerik, seperti Metode FEM 3D, yang berfungsi memodelkan struktur internal transformator inti dan belitan sebagai media propagasi sinyal [18]. Model FEM ini menciptakan representasi grid atau mesh dari komponen internal seperti *Core*, *Winding*, dan *Tank Wall* untuk memperhitungkan rute perambatan gelombang akustik secara detail. Kelemahan dasar pada TDOA adalah distorsi sinyal yang diakibatkan oleh struktur logam internal ini. Untuk mengatasinya, diterapkan *Algoritma Particle-Swarm-Optimization Route-Searching* (PSORS). Manfaat dan keunggulan algoritma PSORS ini adalah kemampuannya mencari rute perambatan sinyal akustik secara optimal, yang terbukti menghasilkan akurasi yang tidak sensitif terhadap penghalang logam, sehingga memungkinkan penentuan koordinat PD yang presisi terlepas dari kompleksitas struktur internal transformator [21]. Kekurangan dari pendekatan ini adalah tingginya kebutuhan akan model simulasi tiga dimensi yang sangat presisi. Meskipun model 3D memiliki tingkat presisi yang tinggi, serta menawarkan wawasan mendalam, namun harga biaya *hardware* yang tinggi dan waktu tunggu yang lama, menjadikannya kurang praktis untuk analisis real-time atau studi optimasi yang melibatkan banyak skenario [18].
 - 4) Teknik Filter dan Algoritma Lanjutan merupakan berbagai teknik filter dan algoritma canggih telah digunakan untuk mitigasi noise dan peningkatan akurasi lokalisasi PD, yang menjadikan perhatian utama dalam diagnostik isolasi. Salah satu contohnya adalah IEKF, yang diusulkan khusus untuk estimasi lokasi PD akustik karena kemampuannya untuk secara signifikan dapat mengurangi kesalahan estimasi dan memitigasi sifat stokastik dari kebisingan pengukuran. Keunggulan utama IEKF dibandingkan EKF konvensional terletak pada kemampuannya untuk menangani sistem nonlinier dengan lebih efektif. IEKF menggunakan istilah koreksi yang adaptif terhadap simetri sistem karena ia mengulang (mengiterasi) proses linearisasi dan pembaruan estimasi (koreksi) beberapa kali per langkah waktu. Proses iteratif ini memungkinkan IEKF untuk menemukan titik linearisasi yang lebih baik, sehingga menjadikannya lebih kuat terhadap dinamika nonlinier yang parah. Selain itu, dengan memperbaiki estimasi status secara berulang, IEKF dapat merepresentasikan ketidakpastian noise dengan lebih akurat, menjadikannya lebih kuat terhadap ketidakpastian noise pengukuran dibandingkan EKF yang hanya melakukan satu kali pembaruan [15]. Selain itu, metode *Time Reversal* (TR) juga digunakan untuk lokalisasi PD dengan cara merekam sinyal PD baik elektromagnetik maupun akustik, serta membalikkan waktu sinyal tersebut, dan mempropagasi ulangnya kembali ke medium secara numerik untuk menciptakan fokus energi yang presisi tepat pada sumber PD. Metode ini menjadi unggul karena dapat mencapai lokalisasi akurat bahkan dengan jumlah sensor yang minimal [10]. Selanjutnya, pendekatan berbasis *Machine Learning* (ML) dan *Deep Learning* (DL) telah menunjukkan hasil yang menjanjikan untuk lokalisasi PD yang lebih cepat dan akurat, dengan memanfaatkan kemampuan kecerdasan buatan (AI) untuk belajar dari data dan mengidentifikasi pola lokasi [17]. Pendekatan ini sering dikombinasikan dengan algoritma pencarian jalur (*pathfinding algorithms*) seperti Algoritma Dijkstra [18] untuk menghasilkan data pelatihan yang efisien tanpa melalui simulasi elektromagnetik yang mahal dan memakan waktu. Kekurangan dari IEKF adalah kompleksitas model yang dibutuhkan [15], sementara ML atau DL memerlukan dataset pelatihan yang besar dan berkualitas tinggi [17].
 - 5) Teknik Lokalisasi PD salah satunya *Electrical Transfer Function-based PD Localization* (ETFL) merupakan metode *online* inovatif yang dikembangkan untuk menentukan sumber lokasi PD secara presisi di dalam belitan transformator. Metode ini menjadi alternatif yang lebih baik daripada metode akustik ketika PD terletak berada jauh di dalam lilitan, karena dalam kondisi tersebut redaman sinyal suara akan tinggi. Cara kerjanya didasari pada analisis respons lilitan yang diukur pada terminal, di

mana lokasi PD ditentukan dengan membandingkan respons frekuensi dari fungsi transfer yang didapatkan (menggunakan sinyal tegangan yang diukur pada *bushing* dan ujung netral) dengan nilai referensi. Keunggulannya adalah kemampuan untuk mendeteksi PD jauh di dalam lilitan, namun kekurangannya adalah bahwa PD hanya memengaruhi posisi titik nol (zeros) dari fungsi transfer, sementara titik kutub (poles) tetap stasioner karena bergantung pada sistem. Dengan membandingkan frekuensi titik nol yang diperoleh dari model lilitan dengan hasil eksperimen, lokasi PD dapat ditentukan [29]. Metode ini unggul untuk diagnosis online dan didasarkan pada prinsip fisik yang kuat, tetapi membutuhkan model lilitan transformator yang sangat akurat dan mungkin rentan terhadap interferensi elektromagnetik karena sifat pengukurannya yang elektrik. Gambar 8 merupakan konsep lokalisasi PD Berbasis ETFL di dalam Belitan Transformator yang mengilustrasikan proses penentuan Lokasi PD menggunakan pengukuran respons frekuensi listrik. Sistem ini menggambarkan metode ETFL untuk menentukan lokasi PD dalam belitan transformator tipe *disc winding* berlapis. Lokasi PD yang ditandai dengan lingkaran merah dan percikan kuning yang terjadi di antara belitan kawat, dengan jarak d dari terminal tegangan tinggi (HV *bushing* berwarna biru). Kemudian sinyal tegangan diukur oleh kedua sensor dalam domain frekuensi diantaranya, $V_1(f)$ pada terminal HV dan $V_2(f)$ pada terminal netral (terhubung ke ground berwarna abu-abu). Bagian analisis Fungsi Transfer menghitung rasio $H(f) = V_2(f) / V_1(f)$, menghasilkan grafik *magnitude* dan *phase*. Karakteristik ini ditandai dengan Zeros (lingkaran merah) pada grafik *magnitude* dimana Frekuensi di mana $H(f)$ bernilai nol, posisinya berubah tergantung pada lokasi PD. Selanjutnya Poles (tanda silang biru) merupakan titik-titik kutub yang stabil karena hanya bergantung pada karakteristik sistem transformator. Lokasi PD kemudian ditentukan melalui pencocokan pola. Frekuensi zeros yang terukur dari sistem secara aktual dibandingkan dengan database model referensi yang berisi prediksi zeros untuk setiap kemungkinan posisi d . Algoritma pencocokan pola menemukan nilai d (ditampilkan dalam kotak hijau) yang menghasilkan pola zeros paling mendekati hasil pengukuran, memberikan informasi lokasi kerusakan yang krusial untuk pemeliharaan prediktif. Grafik domain waktu dan domain frekuensi representatif menunjukkan bagaimana pulsa PD (domain waktu) diubah menjadi spektrum frekuensi dengan puncak-puncak yang berhubungan dengan karakteristik zeros (domain frekuensi).



Gambar 8 Konsep Lokalisasi PD Berbasis Fungsi Transfer Elektrik (ETFL) di dalam Belitan Transformator

- 6) Aplikasi Diagnosis dan Pemantauan Kondisi seperti pada peralatan transformator agar menjadi efektif perlu didasarkan pada dua strategi yang saling melengkapi yaitu diagnosis berbasis lokalisasi dan diagnosis multimetode. Diagnosis berbasis lokalisasi menggunakan informasi posisi PD sebagai

data yang krusial secara spesifik mendiagnosis penyebab PD, seperti keberadaan gelembung di area tertentu. Informasi lokasi ini juga membantu mengidentifikasi jenis dan tingkat keparahan gangguan isolasi untuk perencanaan strategi pemeliharaan dan perbaikan yang tepat. Karena PD dapat menghasilkan berbagai bentuk energi, termasuk sinyal akustik, elektrik, dan termal. Strategi ini dilengkapi dengan diagnosis multimetode, yaitu penerapan beberapa metode diagnostik secara bersamaan untuk penilaian kondisi yang lebih menyeluruh. Sebagai contoh, kombinasi metode AE, yang sangat efektif untuk lokalisasi PD karena non-invasif dan kebal terhadap EMI saat transformator beroperasi *online*. dengan metode lain seperti Pencitraan Termal (*Thermal Imaging*) atau DGA, memungkinkan penilaian komprehensif terhadap kondisi transformator. Manfaat utama dari integrasi berbagai metode ini adalah karena metode kimia seperti DGA, meskipun sensitif, tidak dapat menyediakan informasi lokasi. Oleh karena itu, diagnosis multimetode menjadi sangat penting untuk mencegah kerusakan fatal dan pemadaman listrik yang tidak terencana [12].

III. KESIMPULAN

Diagnosis efektif dan andal terhadap *Partial Discharge* (PD), selanjutnya dapat dilakukan dengan konvergensi antara teknologi sensor mutakhir dan algoritma pemrosesan sinyal yang cerdas. Kemajuan teknologi sensor, dapat mengatasi kelemahan pada sensor elektrik tradisional (IEC 60270) yang sensitif terhadap PD lemah, lalu rentan terhadap EMI (tidak efektif untuk penggunaan *online*) dan tidak menyediakan informasi sumber lokalisasi PD. Kekurangan ini telah dapat diatasi oleh sensor *Ultra High Frequency* (UHF) dan sensor induktif (HFCT) yang memiliki imunitas superior (ketahanan yang lebih tinggi) terhadap EMI dan SNR untuk pemantauan *online*. Selanjutnya untuk jenis lain yaitu sensor akustik (AE) fungsinya dapat dioptimalkan menggunakan model KLM untuk mengetahui sumber lokalisasi spasial (ketika penentuan posisi) melalui perhitungan *Time Difference of Arrival* (TDOA) dan sensor akustik jenis serat optik (FOAS) juga memiliki imunitas total terhadap EMI. Kemudian, pada proses kalibrasi terdapat kelemahan pada sensor non-elektrik yaitu rentan terhadap interferensi *multipath* yang merusak akurasi TDOA. Mengatasi keterbatasan ini, teknik pemrosesan sinyal juga telah berkembang pesat melampaui TDOA dasar, menggunakan algoritma seperti GCC-PHAT untuk meredam kebisingan, Algoritma PSORS dikombinasikan dengan FEM 3D untuk memodelkan jalur perambatan sinyal di sekitar penghalang internal, serta metode ETFL sebagai alternatif lokalisasi elektrik *online* di dalam lilitan transformator. Integrasi antara sensor dengan algoritma cerdas juga dapat didukung oleh *Machine Learning* dan *Deep Learning*. Sehingga strategi ini dapat memunculkan diagnosis multimetode (seperti kombinasi AE dengan DGA atau Pencitraan Termal) yang dapat memberikan informasi lokasi PD yang akurat. Ke depannya dapat dijadikan solusi, pendeteksian PD bisa berfokus pada diagnosis multimetode, yaitu menggabungkan data dari berbagai sensor (AE, UHF, DGA) serta berbeda jenis (data heterogen), dan menganalisisnya secara real-time menggunakan *Deep Learning* untuk menemukan pola lokasi dan kerusakan yang sangat kompleks. Selain itu, diperlukan pengembangan Sensor Nirkabel Pasif yang tidak memerlukan kabel daya untuk memudahkan pemasangan dan meningkatkan imunitas terhadap EMI. Terakhir, sistem lokalisasi harus menggunakan model adaptif yang dapat mengkalibrasi ulang kecepatan rambat sinyal suara secara dinamis (misalnya, menyesuaikan perhitungan lokasi berdasarkan perubahan suhu atau jenis minyak transformator) sehingga menghasilkan perencanaan pemeliharaan prediktif yang jauh lebih cepat, akurat, dan efektif dalam mencegah kerusakan fatal pada peralatan tegangan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Müller, M. H. Samimi, and M. Siegel, "Diagnostic Measurements for Power Transformers," *Energies*, vol. 9, no. 5, p. 347, May 2016.
- [2] S. Li and J. Li, "Condition monitoring and diagnosis of power equipment: review and prospective," *High Volt.*, vol. 2, no. 2, pp. 69–82, Jun. 2017.
- [3] A. Hekmati and R. Hekmati, "Optimum acoustic sensor placement for partial discharge allocation in transformers," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 11, no. 5, pp. 586–593, Aug. 2017.

- [4] F. Witos *et al.*, “Calibration and Laboratory Testing of Computer Measuring System 8AE-PD Dedicated for Analysis of Acoustic Emission Signals Generated by Partial Discharges Within Oil Power Transformers,” *Arch. Acoust.*, vol. 42, no. 2, pp. 297–311, 2017.
- [5] H. Chai, B. T. Phung, and S. Mitchell, “Application of UHF Sensors in Power System Equipment for Partial Discharge Detection: A Review,” *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1029, Feb. 2019.
- [6] W. Sikorski, “Development of Acoustic Emission Sensor Optimized for Partial Discharge Monitoring in Power Transformers,” *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1826, Apr. 2019.
- [7] C. Gao *et al.*, “Partial Discharge Localization inside Transformer Windings via Fiber-Optic Acoustic Sensor Array,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, no. 3, pp. 1198–1205, Jun. 2019.
- [8] M. Ghorat *et al.*, “High-Resolution FBG-Based Fiber-Optic Sensor with Temperature Compensation for PD Monitoring,” *Sensors*, vol. 19, no. 23, p. 5240, Nov. 2019.
- [9] N. A. Akashah *et al.*, “A review: Partial discharge detection using acoustic sensor on high voltage transformer,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1432, p. 012004, 2020.
- [10] H. Karami *et al.*, “Partial Discharge Localization Using Time Reversal: Application to Power Transformers,” *Sensors*, vol. 20, no. 6, p. 1655, Mar. 2020.
- [11] G. Ma *et al.*, “Optical sensors for power transformer monitoring: A review,” *High Volt.*, vol. 5, no. 6, pp. 642–659, Dec. 2020.
- [12] F. Witos, A. Olszewska, Z. Opilski, A. Lisowska-Lis, and G. Szerszeń, “Application of Acoustic Emission and Thermal Imaging to Test Oil Power Transformers,” *Energies*, vol. 13, no. 22, p. 5955, Nov. 2020.
- [13] H. Besharatifard *et al.*, “Detection and Analysis of Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers Using Low-Cost Acoustic Sensors,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 6, p. 3010, Mar. 2022.
- [14] H. Besharatifard, S. Hasanzadeh, E. Heydarian-Forushani, and S. M. Muyeen, “Acoustic Based Localization of Partial Discharge Inside Oil-Filled Transformers,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 55288–55297, 2022.
- [15] W. Al-Masri *et al.*, “Partial Discharge Localization in Power Transformers Using Invariant Extended Kalman Filter,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, 2023.
- [16] Y. Otake and K. Tajiri, “Study of Localization of Partial Discharges in Oil-filled Transformers using Acoustic Emission Signals,” in *4th Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management, Tokyo, Japan*, Sep. 2023.
- [17] J. Q. Chan, W. J. K. Raymond, H. A. Illias, and M. Othman, “Partial Discharge Localization Techniques: A Review of Recent Progress,” *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 302, Dec. 2023.
- [18] C. P. Beura, J. Wolters, and S. Tenbohlen, “Application of Pathfinding Algorithms in Partial Discharge Localization in Power Transformers,” *Sensors*, vol. 24, no. 3, p. 892, Jan. 2024.
- [19] Y. Wang *et al.*, “Acoustic Sensors for Monitoring and Localizing Partial Discharge Signals in Oil-Immersed Transformers under Array Configuration,” *Sensors*, vol. 24, no. 14, p. 4704, Jul. 2024.
- [20] C. P. Beura, M. Beltle, S. Tenbohlen, and M. Siegel, “Quantitative Analysis of the Sensitivity of UHF Sensor Positions on a 420 kV Power Transformer Based on Electromagnetic Simulation,” *Energies*, vol. 13, no. 1, p. 3, Dec. 2019.
- [21] Y. B. Wang *et al.*, “Acoustic Localization of Partial Discharge Sources in Power Transformers Using a Particle-Swarm-Optimization-Route-Searching Algorithm,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 6, pp. 3647–3654, Dec. 2017.
- [22] H. D. Ilkhechi and M. H. Samimi, “Applications of the Acoustic Method in Partial Discharge Measurement: A Review,” *Open Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 42–49, Jan. 2021.
- [23] F. Liu, Y. Shi, S. Zhang, and W. Wang, “Localization for Dual Partial Discharge Sources in Transformer Oil Using Pressure-Balanced Fiber-Optic Ultrasonic Sensor Array,” *Sensors*, vol. 24, no. 14, p. 4450, Jul. 2024.
- [24] A. Rodrigo-Mor, F. A. Muñoz, and L. C. Castro-Heredia, “Principles of Charge Estimation Methods Using High-Frequency Current Transformer Sensors in Partial Discharge Measurements,” *Sensors*, vol. 20, no. 9, p. 2489, Apr. 2020.
- [25] J. Zbojovský, A. Hyseni, and J. Petráš, “Partial Discharge Activity Inductive Sensors and the Application of Magnetic Materials,” *Sensors*, vol. 25, no. 2, p. 5896, Feb. 2025.
- [26] Z. Xu *et al.*, “Passive Wireless Partial Discharge Sensors with Multiple Resonances,” *Micromachines*, vol. 15, no. 5, p. 656, May 2024.
- [27] A. N. Hamoodi, S. A. Hamoodi, and R. A. Mohammed, “Partial discharge calibrator of a cavity inside high-voltage insulator,” *Open Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 468–476, 2022.
- [28] Y. Otake and K. Tajiri, “Enhanced Method for Localization of Partial Discharges in Oil-Filled Transformers Using Acoustic Emission Signals,” in *4th Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management, Tokyo, Japan*, Sep. 2023.
- [29] A. Hamidi, M. Salehi, A. Setayeshmehr, and J. M. Maritz, “Electrical Modeling of High Voltage Windings of Power Transformers for Online Partial Discharge Localization,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 3549634, Mar. 2025.
- [30] [M. Mondal and G. B. Kumbhar, “Partial Discharge Localization in a Power Transformer: Methods, Trends, and Future Research,” *IETE Tech. Rev.*, vol. 33, no. 6, pp. 589–598, 2016.